

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0084

공기보조 분사기와 고압 선회식 분사기의 특성 비교 - Part I: 유량 및 거시적 분무특성

Comparison of Overall Characteristics between an Air-Assisted Fuel Injector and a High-Pressure Swirl Injector - Part I: Flow Rate and Macroscopic Spray Characteristics

장 창 수*, 최 상 민*
Changsoo Jang, Sangmin Choi

ABSTRACT

Characteristics of two favorite injection tools for gasoline direct injection application were compared. An air-assisted fuel injector (AAFI) and a high-pressure swirl injector (HPSI) were designed and fabricated for prototype development, and the characterization strategies and processes for both injection tools have been arranged in parallel. Characterization works were carried out mainly through measurements, and in some cases, computational fluid dynamic analysis was utilized. In this paper, overall characteristics defined as flow rate, spray pattern, penetration, internal spray structure and drop size distribution, was discussed. The AAFI was found to be advantageous in flexibility of fuel flow rate, and the HPSI in stability and precision. Spray shape factor was introduced to describe the development of intermittent sprays from both injectors. Axial penetration appeared to be almost linear in the case of the AAFI while its speed continuously decreased with time in the HPSI.

주요기술용어 : gasoline direct injection engine(직접분사식 가솔린 엔진), air-assisted fuel injector(공기보조 분사기), high pressure swirl injector(고압 선회식 분사기), spray shape factor(분무형태상수)

Nomenclature

AAFI : air-assisted fuel injector

ALR : air-liquid mass ratio

HPSI : high-pressure swirl injector

MPI : multi-point injection

P : pressure, Pa

θ : angle, degree

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

Subscripts

amb : ambient
inj : (fuel) injection
sup : (air) supply

1. 서론

포트분사방식 엔진의 성능 발전이 한계에 다다름에 따라 지속되는 연비와 배기가스 규제에 대응하기 위해 가솔린 직접분사방식이 1980년대에 2행정 기관에 대하여, 1990년대에는 4행정 기관에 적용되기 시작하였다. 비록 완성된 기술은 아니지만 현재까지 상용화된 엔진도 소개되고 있으며,^{1,2)} 많은 발전이 이루어져왔다. 직접분사 방식은 가솔린 연료를 디젤 분사와 비슷하게 실린더 내로 직접 분사하여 스파크 플러그를 통해 연소를 제어함으로써 스파크 점화방식 엔진의 장점인 연소 제어성과 디젤 엔진의 장점인 뛰어난 열효율을 모두 얻을 수 있게 하는 방식이다.³⁾ 따라서 직접분사식 가솔린 엔진이 개발되기 위한 가장 중요한 요건 중의 하나는 여기에 적용되어지는 연료분사기의 성능이라고 할 수 있다.⁴⁾ 포트분사방식과는 달리 분사기에서 나오는 분무장의 특성이 연소성능에 직접적인 영향을 미치기 때문에 이 부분에 대한 연구의 중요성을 무시할 수 없다. 이에 따라 많은 연구가 여기에 적용되는 분사기의 분무특성을 파악하는데 집중되어지고 있다. 이러한 연구의 동향과 결과들은 Zhao *et al.*⁵⁾의 논문에 정리되어있다.

공기보조 분사기(Air-Assisted Fuel Injector; 이하 AAFI)는 10 μ m 대의 평균입경을 가지는 분무장을 손쉽게 만들 수 있는 뛰어난 미립화 성능이 가장 큰 특징으로 꼽히며, 보조공기를 이용하여 분무장의 방향이나 형태를 제어하기가 용이하다는 장점을 가지고 있다.⁶⁾ 하지만 고압의 보조공기를 얻기 위해서는 따로 공기 압축기나 엔진 블록 내에 복잡한 장치가 필요하게 되고, 분사기 구동 제어가 복잡하며, 분사기 본체의 크기가 크기 때문에 4행정 기관에서 엔진에 장착하는데 난점이 있는 등의 단점을 안고 있다. 이의 개선을 위해 최근에는 Direct Mixture Injection⁷⁾ 방식이

제안되기도 했다. Houston and Cathcart⁸⁾는 공기 압축기를 엔진 내에 장착하고 AAFI를 직접 연소실에 장착한 엔진을 개발하여 발표한 바가 있다.

고압선회식 분사기(High-Pressure Swirl Injector; 이하 HPSI)는 이 분사기를 장착한 엔진이 최초로 상용화되면서 많은 엔진 개발자들의 관심을 끌게 되었고, 현재는 대부분의 직접분사식 엔진에 이의 적용연구가 활발히 진행되고 있다. 단상 분사이면서도 선회 분사의 특성상 비교적 뛰어난 미립화 성능을 유지하면서 연소에 적합한 분무장 구조를 가지는 장점을 가지고 있다. 반면에 점도가 낮은 가솔린 연료의 특성으로 인한 고압펌프의 내구성 문제와 분사기 오리피스 팁 부위에서 생기는 탄소 침착물(deposit)은 HPSI의 단점으로 지적되고 있다. Fig. 1은 두 분사장치의 전형적인 연료분사형태를 간략하게 도식한 것이다.

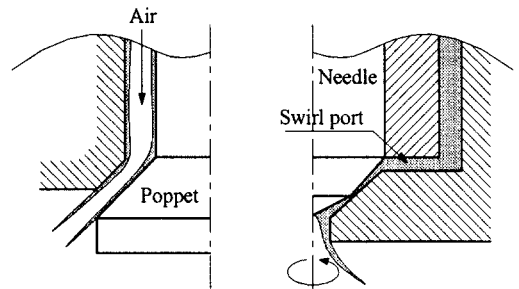


Fig. 1 Typical schematics of air-assisted fuel injection (left) and high pressure swirl injection (right)

AAFI와 HPSI의 성능에 대한 비교연구는 아직까지 Hoffman *et al.*⁹⁾에 의해 공간 및 시간적인 유량 특성 비교만 발표되어있다. 다른 특성들의 경우는 그동안 서로에 대한 비교가 거의 이루어지지 않고 각자의 엔진 시스템에 적용되어왔다. 본 연구는 AAFI와 HPSI 양쪽에 대하여 동일한 연구방법과 절차를 통해 얻은 결과들^{10,11)}을 비교함으로써 두 분사장치의 유량 및 분사 특성을 엔진 적용 측면에서 비교 분석하고자 하였다. 본 논문에서는 분사기 특성 중 유량 및 거시적인 부분을 다루어졌으며, 분무입경, 분무장 구조 등의 미

시적인 부분은 II편¹²⁾에서 다루어졌다. 본 논문 내의 모든 압력표기는 상대압력(gage pressure)이다.

2. 실험장치

2.1 실험용 분사장치

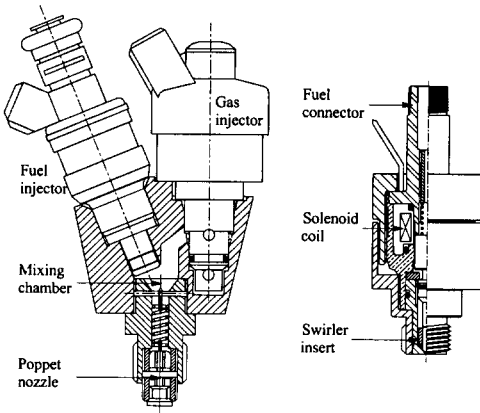


Fig. 2 Prototype of the AAFI (left) and the HPSI (right)

Fig. 2는 본 연구에 사용된 AAFI와 HPSI의 구조를 보여준다. AAFI는 크게 연료 및 공기 분사부, 혼합부, 노즐부로 이루어져 있다. 연료분사는 MPI 분사기를, 공기분사는 가스 분사기를 사용하였다. 대부분의 AAFI에서 그렇듯이 본 연구에서 사용된 AAFI도 미리 연료가 분사되어 혼합실에 공기와 함께 있다가 포핏 노즐이 열리면서 외부로 분사된다. 전단계의 연구를 통해 각각의 설계변수에 대한 연구를 통하여 내부 구조를 최적화하는 노력을 기울였다.¹³⁾

HPSI는 기존의 MPI 분사기 본체와 노즐을 개조하여 제작하였으며, 7MPa 이상의 고압 운전이 가능하도록 분사기 내의 여러가지 설계변수들을 제어하였다.¹⁴⁾ 여러 단계의 설계 및 제작을 통하여 최종적으로 2단 핀형(2-stage pin type)의 니들을 채용한 분사기 노즐을 제작하였으며, 분무특성은 이 노즐에 대하여 이루어졌다.

2.2 분무특성 측정장치

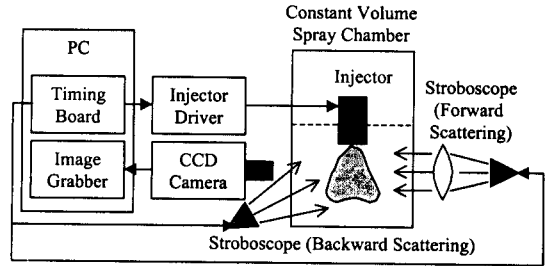


Fig. 3 Spray visualization system

분무장의 거시적 특성을 파악하기 위해 상황에 맞도록 전방 혹은 후방 산란(forward or backward scattering) 기법을 이용하였다.(Fig. 3) 빠른 속도로 움직이는 분무장을 정지시키는데 스트로보스코프(stroboscope)가 광원으로 사용되었고, CCD 카메라로부터 화상을 획득하여 컴퓨터로 입력하였다. 저장된 화상으로부터 적절한 그레이 스케일도 레벨을 기준으로 분무장의 경계면이 결정되어지고 이를 통하여 필요한 정보가 얻어졌다. 모든 제어과정은 컴퓨터에 내장되어있는 화상보드와 타이밍보드를 통해 이루어졌다.

또한 엔진 연소실을 모사하기 위하여 2-D 위치제어 기능이 있고, 측정 중에 액체 연료에 의한 오염을 방지하기 위해 신선한 공기의 지속적인 순환이 가능한 정적 분무실이 활용되었다. 연료 공기 혼합기가 빠져나가는 노즐과 신선한 공기가 들어오는 노즐을 각각 2곳 씩 분무실 외벽에 설치하였으며, 순환되는 공기가 분무장의 유동에 미치는 영향을 최소화하기 위해 정적 분무실의 직경을 340mm로 설정하여 제작하였다. 분무장의 가시화를 위해 직경 110mm의 가시화 창이 사용되었다.

실험변수로는 두 분사기 모두 분사압력과 주변 압력을 두었으며, AAFI의 경우 공기연료질량비 (Air-Liquid mass Ratio; 이하 ALR)가 변수로 추가되었다. 유체는 AAFI의 경우 상용 가솔린을, HPSI의 경우 n-heptane을 사용하였다. 두 유체의 점도가 거의 같기 때문에 점도의 영향에 의한 차

이점은 무시할 만 할 것으로 사료된다. 본 연구에 서는 모든 실험이 상온에서 진행되었다.

3. 결과 및 토의

3.1 연료유량(fuel flow rate)

두 가지 분사기는 분사방식이 다르기 때문에 유량제어 면에서도 다른 점을 가지고 있다. AAFI 는 내부에 있는 연료분사기로부터 미리 연료를 공급받아 혼합실에 저장한 후에 공기와 함께 연료를 분사하기 때문에 최대 유량이 거의 제한되지 않는다. 또한 정적 유량의 변화도 얼마든지 가능하다. 반면에 혼합실에서 노즐까지의 공간으로 인해 혼합실에 모여진 연료들이 정확하게 노즐부 까지 이동되고 분사되며, 이러한 분사과정이 정확한 반복성을 가지면서 진행될 것인가 하는 것은 확신하기 어렵게 된다.

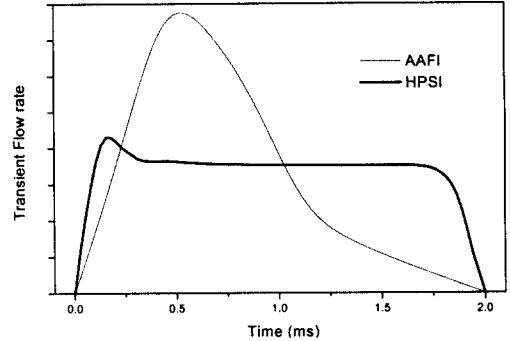


Fig. 4 Typical pattern of transient flow rate of AAFI and HPSI

HPSI의 경우 노즐의 구조와 슬레노이드 부하의 한계상 최대 유량에 한계가 있고, 유량이 한번 결정되고 나면 큰 폭의 변화를 기대하기 어렵게 된다는 단점이 있다. 반면에 분사가 단순히 HPSI 노즐에서 이루어지기 때문에 반복성이나 정확한



Fig. 5 Spray development of the AAFI. $P_{sup} = 0.7\text{MPa}$, $P_{amb} = 0\text{MPa}$. Time interval is 1ms



Fig. 6 Spray development of the HPSI. $P_{inj} = 5\text{MPa}$, $P_{amb} = 0\text{MPa}$. Time interval is 1ms

연료량 제어가 용이하다.

두 분사기의 과도유량변화를 보기 위해 AAFI에서는 사진영상처리방법을 이용하여 측정함으로써, HPSI에서는 가변 그리드(moving grid)를 이용하여 내부유동 계산을 수행하였다(두 측정법 및 측정결과에 대한 자세한 사항은 참고문헌^{10,11})에 기술되어있다.) 비교를 위하여 유량값을 정규화시킨 결과가 Fig. 4에 나타나있다. AAFI는 일정한 유량을 유지하지 못 하고 분사시간 중의 어떤 한 부분에 집중되어 연료를 분사시킨다. 이러한 경향은 Hoffman *et al.*⁹⁾의 연구결과에서도 나타난다.

HPSI는 안정된 과도유량 특성을 보이기는 하지만, 분사기 내부에서 선회 유동장이 형성되어가는 시기인 초기 유량 제어가 어렵기 때문에 미량 연료분사시 동적 유량의 선형성을 얻기가 어렵다. AAFI에서 사용하는 연료분사기는 대부분의 기존의 비선회 MPI 분사기이다. 이러한 분사 방법은 선회 분사에서보다 뛰어난 초기 유량 선형성을 보이기 때문에,¹⁵⁾ 미량 분사에서의 연료량 제어성은 AAFI가 더 유리하다고 볼 수 있다.

3.2 분무장 형태(spray pattern)

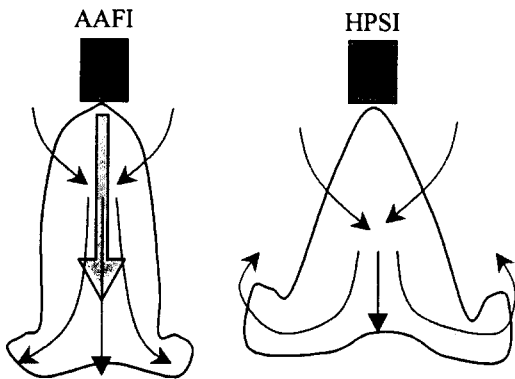


Fig. 7 Schematics of internal flow in sprays from two injectors

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 AAFI와 HPSI의 전형적인 분무장 형성과정을 보여주고 있다. 두 경우 모두 분무장 중앙부에 생기는 저압공간으로 인해

분무장 외곽으로부터 공기가 유입되고, 초기의 중공원추형(hollow cone) 분무장이 솔리드 콘(solid cone) 형태로 붕괴되며, 분무각이 감소되어진다. 이때 AAFI의 경우 보조공기의 양이 감소하면 분무장이 추진되는 모멘텀이 부족하게 된다. 또한 외부공기의 유입도 약해지기 때문에 Fig. 5의 아래 사진들에서 보이는 바와 같이 침투 깊이가 감소하며 삼각형 형태의 분무장을 생성시키게 된다.

Fig. 7은 양쪽 분무장 내에서 일어나는 공기유동의 형태를 보여주고 있다. 이러한 경향은 Miyamoto *et al.*¹⁶⁾과 Preussner *et al.*¹⁷⁾의 계산연구를 통해 분석되어진 바 있다. 두 그림은 공기의 유입으로 인해 분무장 중앙부에 그것에 휩쓸린 작은 액적들이 존재하게 될 것을 보여준다. 또한 유입된 공기의 일부는 분무장 선단 외곽의 와류를 형성하기도 하고, 중앙부 액적들의 침투를 돕기도 한다. 이때 자체 모멘텀이 큰 액적들은 이러한 유동에 휩쓸리지 않고, 분무장 후부에 남아있게 되거나 외곽을 따라 가장 멀리 전진하게 된다.¹²⁾ HPSI에서는 유입된 공기가 빠져나가면서 큰 단일 도너츠형 와류(toroidal vortex)를 형성시키는 반면, AAFI의 경우 분무장 선단에 비슷한 와류가 형성되었다가 뒤이어 유입되는 분사공기에 의해 사라지는 것을 반복하게 된다.(Fig. 5)

AAFI 분무장과 같은 경우 너무 빨리 분무장의 중공원추 형태가 붕괴되기 때문에 분무각이 사실상 의미를 갖지 못 한다. 따라서 분무의 전진하는 형태를 정의하기 위해 분무각과 비슷한 개념의 분무형태상수(spray shape factor; θ_{sf})를 아래와 같이 도입하였다.

$$\theta_{sf} = \text{Arctan} \left(\frac{\text{transient spray width}}{\text{spray tip penetration}} \right) \quad (1)$$

두 분사기에서 나오는 분무장의 시간에 따른 분무형태상수의 변화는 Fig. 8에 나타나있다. AAFI 분무장은 ALR에 따라 차이는 생기지만 옆으로 퍼지는 정도보다 앞으로 진행하는 모멘텀이 크기 때문에 이 값이 지속적으로 감소하였다.

HPSI의 경우 초기에는 공기의 유입으로 인해 분무장이 수축하다가 도너츠형 와류가 생성되면서 다시 증가하고, 이후에는 거의 일정한 값을 나타내었다.

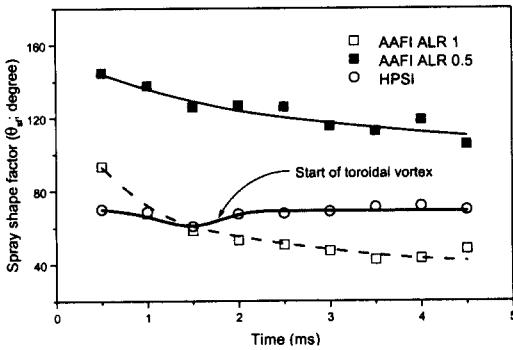


Fig. 8 Spray shape factor variation of two injection tools with respect to time

3.3 침투깊이(penetration depth)

AAFI에서 분사되는 분무장은 초기에 거의 직선적인 침투깊이의 증가를 보이다가 분사된 공기와 주변 공기의 혼합이 충분히 이루어진 시점에서 갑자기 급격하게 감소되는 경향을 보인다. 반면에 일반적인 단공노즐에서 분사되는 분무장은 액주가 깨어져서 액적으로 되는 과정에서 공기의 항력으로 인해 자체 모멘텀을 잃어버리기 때문에 시간이 지남에 따라 점점 속도가 줄어드는 경향을 나타낸다. 선회 분사의 경우 비슷한 과정을 겪지만, 공기와와의 상호작용이 더 강하고, 그 강도가 미립화 정도에 따라 많은 차이를 일으키기 때문에 단공 디젤노즐에 대한 기존의 실험식¹⁸⁾이나 단순한 모멘텀 이론에 잘 맞지 않음을 볼 수 있다¹⁹⁾.

본 연구에서는 실제 엔진 연소실 상황을 고려하여 분사 후 3ms 이내, 침투깊이 100mm 이내에 대하여 측정실험을 수행하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 AAFI와 HPSI에 대하여 각각 측정결과를 보여주고 있다. 측정결과로부터 두 분사기의 분무장이 발전하는 범위가 비슷함을 볼 수 있다.

경향으로는 앞 절에서 분무형태상수를 통하여 논의된 바와 같이 AAFI는 어느 한도 이상은 발전하지 않는 반면, HPSI에서는 지속적으로 그 폭이 넓어진다.

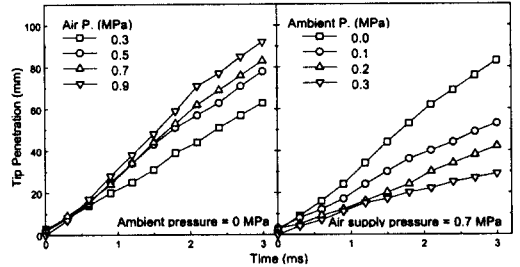


Fig. 9 Influence of air injection pressure and ambient pressure on spray tip penetration of the AAFI

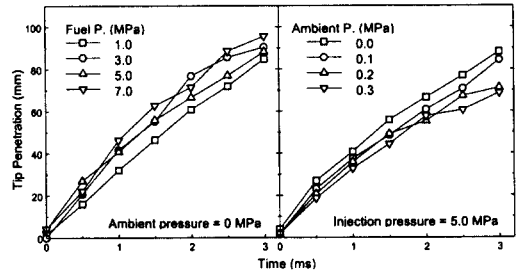


Fig. 10 Influence of fuel injection pressure and ambient pressure on spray tip penetration of the HPSI

AAFI 분무장은 공기공급압이 높아질수록 분사공기의 모멘텀도 증가되어 침투깊이가 증가되는 경향을 보이게 된다. 반면에, HPSI에서는 분사압력이 높아지면서 초기 침투속도는 증가하지만 미립화와 공기와의 혼합 등으로 인해 감소율도 함께 증가된다. 이러한 현상은 분사 후기로 가면 분사압력과 관계없이 거의 비슷한 침투깊이를 형성시킨다.

주변압력의 영향은 AAFI에서 더 큰 것으로 나타났다. 이것은 주변압력의 증가에 따른 AAFI의 공기 분사압력차(injection pressure difference; $P_{inj} - P_{amb}$)의 감소가 크기 때문이다. HPSI의 경우 분사압력이 높아서 연료 분사압력차의 변화가

상대적으로 작기 때문에 AAFI보다 덜 민감하게 영향을 받는다. 두 경우 모두에 있어 주변압력의 증가는 밀도의 증가로 인하여 항력을 증가시켜 침투가 느려지게 만든다.

분사압력과 주변압력 외에 분무장의 침투에 영향을 미치는 변수로는 HPSI에서는 분무각이 있고, AAFI에서는 ALR이 있다. 유철호 등²⁰⁾은 세 가지 분무각을 가지는 분사기들의 특성과약을 통하여 분무각이 클수록 축방향 침투깊이가 작아짐을 보여주었다. ALR은 그 값이 커질수록 AAFI의 분무장 침투속도도 커지지만, 어느 한도 이상에서는 침투에 거의 영향을 미치지 않는다.¹⁰⁾

4. 결 론

현재 직접분사식 가솔린 엔진에 적용되고 있는 AAFI와 HPSI의 시제품이 제작되어 이들의 특성이 비교되었다. 이러한 비교를 통하여 엔진 적용성을 비교평가하고자 하였다. 본 논문에서는 유량특성과 분무장 형태, 침투깊이 등의 거시적 분무특성이 파악되었다.

연료유량 측면에서 AAFI는 연료유량의 가변성이, HPSI는 안정성과 정확성이 유리한 것으로 나타났다. 보조공기의 큰 모멘텀과 주변공기의 강한 유입으로 인해 AAFI의 분무장은 HPSI에서와 같은 원추형태의 분무장이 분사직후에 붕괴되어 사각형 모양의 분무장을 형성하였다. 두 분무장의 분무형태를 설명하기 위해 분무형태상수가 도입되었다. 측정조건 내에서 AAFI의 침투속도는 거의 일정한 반면, HPSI에서는 지속적인 감소 추세를 나타내었다. 이것은 액적의 모멘텀 손실 때문이며, AAFI에서는 보조공기의 역할로 인해 이러한 감소추세가 약하게 나타났다. 균일혼합 측면에서 AAFI는 보조공기에 의한 지속적인 고 빠른 침투가, HPSI는 넓게 퍼지는 분무장 형태가 유리하게 작용할 것으로 예측된다. 성층화 측면에서는 두 경우 모두 좁은 분무장과 작은 침투속도를 가짐으로써 도움을 줄 수 있을 것으로 보인다.

참 고 문 헌

- 1) J.B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, 1988.
- 2) T. Kume, T. Iwamoto, K. Iida, M. Muramaki, K. Asishino and H. Ando, "Combustion Control Technologies for Direct Injection SI Engine", SAE Technical Paper 960600, 1996.
- 3) J. Harada, T. Tomita, H. Mizuno, Z. Mashiki and Y. Ito, "Development of a Direct Injection Gasoline Engine", SAE Technical Paper 970540, 1997.
- 4) R.M. Frank and J.B. Heywood, "The Importance of Injection System Characteristics on Hydrocarbon Emissions from DISC Engine", SAE Technical Paper 900609, 1990.
- 5) F.Q. Zhao, M.C. Lai and D.L. Harrington, "A Review of Mixture Preparation and Combustion Control Strategies for Spark-Ignited Direct-Injection Gasoline Engine", SAE Technical Paper 970627, 1997.
- 6) 이용표, 장창수, 김승수, "2-유체 분사기의 개발과 가솔린 직분 엔진에의 적용", 1996 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집 Vol.II, pp.117-125, 1996.
- 7) G.K. Fraidl, W.F. Piock and M. Wirth, "Gasoline Direct Injection: Actual Trends and Future Strategies for Injection and Combustion Systems", SAE Technical Paper 960465, 1996.
- 8) R. Houston and G. Cathcart, "Combustion and Emissions Characteristics of Orbitals Combustion Process Applied to Multi-Cylinder Automotive Direct Injected

- 4-Stroke Engines”, SAE Technical Paper 980153, 1998.
- 9) A. Hoffman, E. Eberhardt and J.K. Martin, “Comparison between Air-Assisted and Single-Fluid Pressure Atomizers for Direct-Injection SI Engines Via Spatial and Temporal Mass Flux Measurements”, SAE Technical Paper 970630, 1997.
- 10) C. Jang, S. Kim, and S. Choi, “An Experimental and Analytical Study of the Spray Characteristics of an Intermittent Air-Assisted Fuel Injector”, *Atomization and Sprays* (accepted), 1999.
- 11) C. Jang, S. Choi, C. Bae, J. Kim and S. Baik, “Performance of Prototype High Pressure Swirl Injector Nozzles for Gasoline Direct Injection”, SAE Technical Paper 1999-01-3654, 1999.
- 12) 장창수, 최상민, “2유체 분사기와 고압 선회식 분사기의 특성 비교 - Part II: 미시적 분무특성”, 한국자동차공학회 논문집 (submitted), 2000.
- 13) Y.P. Lee, S.S. Kim and S.M. Choi, “A Study of Two-Phase Injector Performance for Direct-Injection Stratified-Charge Engines”, *Atomization and Sprays*, Vol.8, pp.199-215, 1998.
- 14) 장창수, 우동기, 최상민, “GDI를 위한 고압 스윙 분사기의 개발”, 1997 한국 자동차공학회 추계학술대회 논문집 Vol.I, pp.69-74, 1997.
- 15) J.L. Chen, G. Chen and M. Wells, “Dynamic and Static Flow Analysis of a Gasoline Fuel Injector”, *ASME Trans. J. Eng. For Gas Turbine and Power*, Vol.115, pp.750-755, 1993.
- 16) T. Miyamoto, T. Kobayashi and Y. Matsumoto, “Structure of Spray from an Air-Assisted Hollow-Cone Injector”, SAE Technical Paper 960771, 1996.
- 17) C. Preussner, C. Döring, S. Fehler and S. Kampmann, “GDI: Interaction Between Mixture Preparation, Combustion System and Injector Performance”, SAE Technical Paper 980498, 1998.
- 18) M. Arai, M. Tabata, H. Hiroyasu and M. Shimizu, “Disintegrating Process and Spray Characterization of Fuel Jet Injected by a Diesel Nozzle”, SAE Technical Paper 840275, 1984.
- 19) T. Tomoda, S. Sasaki, D. Sawada, A. Saito and H. Sami, “Development of Direct Injection Gasoline Engine Study of Stratified Mixture Formation”, SAE Technical Paper 970539, 1997.
- 20) 유철호, 박종호, 이내현, 최규훈, “가솔린 직분식 인젝터의 분무 및 연소특성에 관한 연구”, 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, Vol.II, pp.359-365, 1996.